参考資料

東芝ＬＥＤ
アプリケーションノート

光に関する用語と単位系

東芝 LED アプリケーションノート (光に関する用語と単位系)

はじめに

LED とその応用による照明器具の特性を示すために、光の明るさまたは質の定義が必要になります。LED の規格には、応用によりいくつかの用語と単位が使用されます。これらの用語と単位を理解することで LED の選択や照明器具の設計に役立てられると考えます。本アプリケーションノートでは平易な表現で LED の性質とそれを表す用語、更に LED の応用上必要な単位系などを紹介します。

1. 光の色

1.1 光の色とは

ご存じのように、太陽の光には、虹にみられる美しい複数色の光が含まれています。虹の色は、日本では紫・藍・青・緑・黄・橙・赤の 7 色とされますが、5 色や 6 色とされている国もあるようです。このように色の定義はさまざまあります。太陽の光にはさまざまな波長を含んでおり、一般に、380nm(ナノメートル、10 億分の1メートル)から 780nm の波長をもつ光を可視光(visible radiation light)と呼びます。日本工業規格 (JIS) では可視光の波長範囲は、短波長限界は 360～400nm、長波長限界は 760～830nm にあると規定しています [1]。

光を扱う LED 分野では、実用上 380～780nm の範囲とすることが一般的です [2]。可視光は虹の色のように人間の目では色として見分けることができます。また、単一の波長に分解された光を単色光(monochromatic radiation)といい、単色光を波長ごとの強度分布として並べたものをスペクトル(spectrum)と言います。図1は太陽光のスペクトル分布を表しています。米国エネルギー省の再利用可能エネルギー研究所 (National Renewable Energy Laboratory) が公開した、米国材料試験協会 (ASTM) が標準化したデータより示したものです。図 1 で示すように、380nm～780nm は可視光領域で、光の波長が 380nm より短い部分は紫外線領域(ultraviolet radiation)、光の波長が 780nm 以上の部分は赤外線領域(infrared radiation)となります。可視光領域以外の紫外線領域、赤外線領域の光は人間の目には色として見ることが出来ない光です。

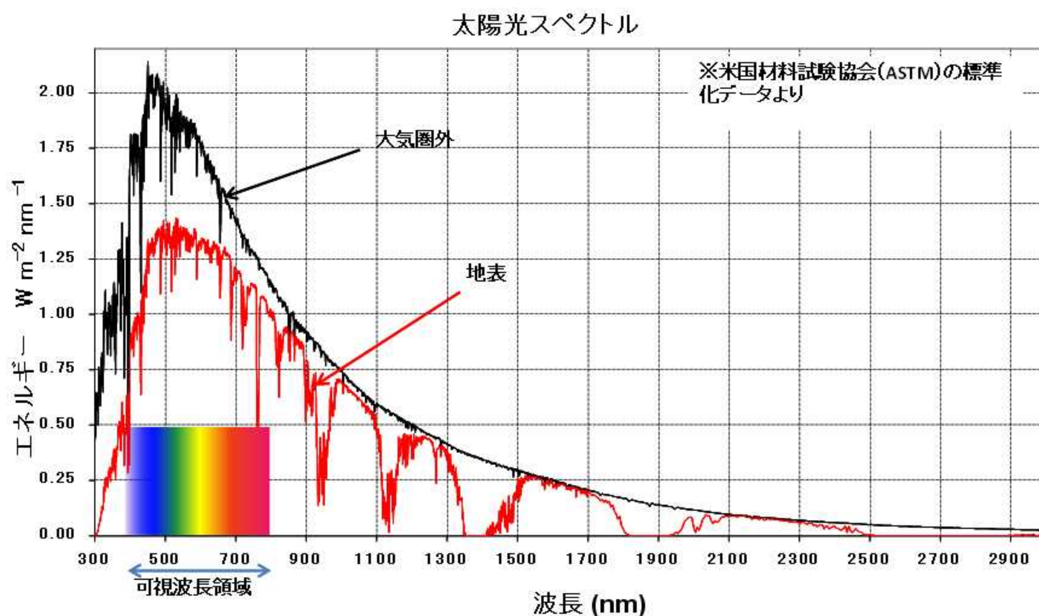


図 1. 太陽光のスペクトル分布

図2は、白色 LED (色温度 5000K)のスペクトル分布例を表したものです。白色 LED の光は単一波長ではなく、広帯域のスペクトルになっていることが分かります。おおよそ 400nm から 780nm の単色光を混ぜ合わせることで白色を表現しています。また、図2から分かるように、LED の光は太陽や白熱灯、蛍光灯などの光源と比較すると、紫外線や赤外線をほとんど含まないということができます。そのため、紫外線や赤外線に敏感な文化財や芸術品などの照明にも採用されつつあります。

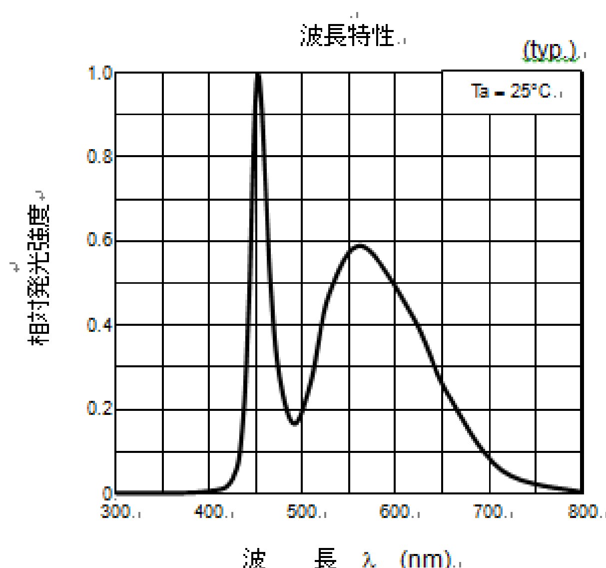


図2. 白色 LED の発光スペクトル分布例 (色温度 5000K)

1．2 光の色を表す単位系

光はさまざまな波長をもつ単色光の集まりであることを説明しました。同じように白く見える光であっても、そのスペクトルに含まれている波長成分が違うことがよくあります。つまり、単色光の混ぜ方によって色が違いますし、同じ色でも異なった色の混ぜ方で成り立たせることもできます。光の色の認識には個人差があります。そのため、色を完全に表現するのは非常に困難です。さまざまな方法が提案されていますが、ここではもっともよく使われている標準的な光の色を表す方法について紹介します。一般に、光を発する光源の色を表すには色温度と色度を用います。光に照らされた物体の色再現性の観点から、演色評価数が用いられます。以下、これらを説明します。

1．3 色温度

色温度 (color temperature) とは、黒体から放射される光の色を基準として、その時の黒体の温度を用いて色を表す方法です。単位には熱力学的温度のケルビン (K) を用います。黒体 (black body) とは、波長、入射方向などに関わらず、外部から入射されるあらゆる放射を完全に吸収し、または放出できる理想的な熱放射体のことを示します。黒体の温度が低い時には、赤色に近い暗いオレンジ色となります。黒体の温度が上昇するにつれ白色に変っていき、さらに温度が高くなると、青味がかった白となります。このように、黒体の温度とその時の発光色とを関連付けたものが色温度です。

多くのデジタルカメラにはホワイトバランス機能があり、晴天、曇りなど設定することができます。これは光の色温度を変化させることに相当します。図3はその色温度のイメージです。ろうそくや朝日、夕日の色温度はおおむね 2000 K であり、太陽光線はおおよそ 5000～6000 K 程度の色温度をもっています。特に、雲のない澄み切った空の太陽光線は色温度が 6500 K 程度と言われています。色が赤っぽくなるほど色温度が低く、逆に青白っぽくなるほど、色温度が高くなります。



図3. 色温度のイメージ

黒体の発光色を色度図 (1．4にて説明します) にプロットすると、図4の中心に示す黒い曲線となります。黒体の発光色はこの曲線に沿って変化していきます。この軌跡を黒体軌跡と呼び、曲線上の色温度を絶対色温度と呼びます。したがって、絶対色温度で表現できる色はこの曲線上にある色だけになります。しかし、現実に存在する光源はすべてこの黒体軌跡上にあるとは限りません。特に白色 LED のような人工光源は黒体軌跡からずれたところにあるのがほとんどです。光源の色が黒体軌跡上にない場合、図 4

に示すように、黒体軌跡から等色温度線を引いて（黒体軌跡の曲線と交差するたくさんの線）色温度を求めます。この直線上にあるすべての点は黒体軌跡と同じ色温度で表されます。直線の長さについて、JIS 規格では黒体軌跡との距離が 0.02 以内と決められています。このような、黒体の温度と完全に一致しませんが、等色温度線上の点を相対色温度として扱います。

照明用白色 LED の白色のレベルを示す一つの指標として相対色温度を用います。JIS Z 9112 で規定された照明用ランプの色温度の分け方 [3]を表1に示します。2600～3250K の色温度をもつ LED は従来の白熱電球のようにオレンジっぽい色を示しており、電球色（記号：L）と分類されます。3250～3800K の色温度をもつ LED は電球色よりは白っぽくなりますが、温かみが帯びた白になるため、温白色(記号：WW)と名付けます。3800～4500K は白色（記号：W）、4600～5500K は普通の昼の色に近いため昼白色（記号：N）とします。5700～7100K は青みがかった真昼の色に近いため昼光色（記号：D）と分類されます。このように、照明用白色 LED は、いくつかの色温度の製品が実現されています。一つの色ではなく、様々な色を表すことができるため、応用や好みにより、色温度を選択することができます。

表1．白色 LED の色温度の分け方

光源色の種類	記号	相関温度（K）
昼光色	D	5700～7100
昼白色	N	4600～5500
白色	W	3800～4500
温白色	WW	3250～3800
電球色	L	2600～3250

1．4 色度

光の色を表現するため、光の3原色、R（赤色：Red)、 G（緑色：Green)、B（青：Blue)が提唱されています。光の色はこの3原色であるR、G、Bにより表現できます。つまり、R、G，Bそれぞれの光をある比率で混ぜ合わせることにより、さまざまな光の色を表すことができます。人間の目は波長に対して感度特性を持っています。それを考慮して数値化した色を表す座標空間が作られています。X,Y,Z 空間と言います。X,Y,Z に基づく表色系で、CIE 1931 表色系(X,Y,Z 表色系とも言います)があります。国際照明委員会(CIE)が規定した光の色の標準国際表示法となります。同表色系による2つの数値 X,Y を使って X,Y 座標空間で色を表したものを CIE 色度図（CIE chromaticity diagram）[4] と呼ばれます。日本では JIS Z8701 で規定されています [5]。図4はその CIE 色度図を表しています。色度図の周囲は光の波長を表しており、それぞれの単色はこの波長により表されています。周囲以外は混色を表しています。このように、色度とは CIE 色度図の座標 Cx,Cy より光の色を表すものとなります。

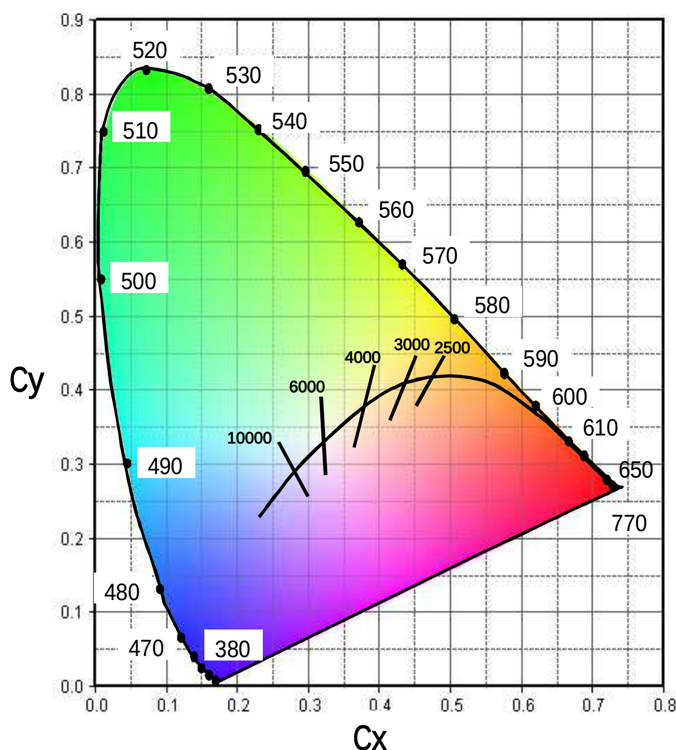


図4．CIE1931 色度図と色温度

一般に、照明用白色 LED の色を表する場合は、相対色温度と色度 Cx,Cy の両方を使用されます。相対色温度で色の指標を示し、色度 Cx,Cy にて相対色温度で表すことのできない色のずれを表します。Cx,Cy の値にて細かく色のランクを分けて、商品化されることが一般的です。したがって、ある色温度の LED に対して Cx,Cy が 1 つではなく、幅を持つことになります。通常、Cx,Cy の幅が狭

ければ狭いほど、同じ色温度の LED の色のずれが少なく、複数の LED で照明器具を形成する場合、より均一な発光が得られます。各色温度に対する Cx,Cy の幅の決め方はさまざまですが、一般に ANSI 規格と呼ばれる米国規格協会 (America National Standard Institute) が定めた規格が使われます。図 5 にそれぞれの色温度に対する CxCy の ANSI 規格を示します。図 5 で示す ANSI の Cx,Cy の幅があっても、人間の目には色のずれとして認識できません。ANSI 規格は色のずれ量に対して経済的な考慮を含め、決められています。商品化の場合は、この ANSI 規格を更に分割して、ランクを細かく決めることが一般的です。

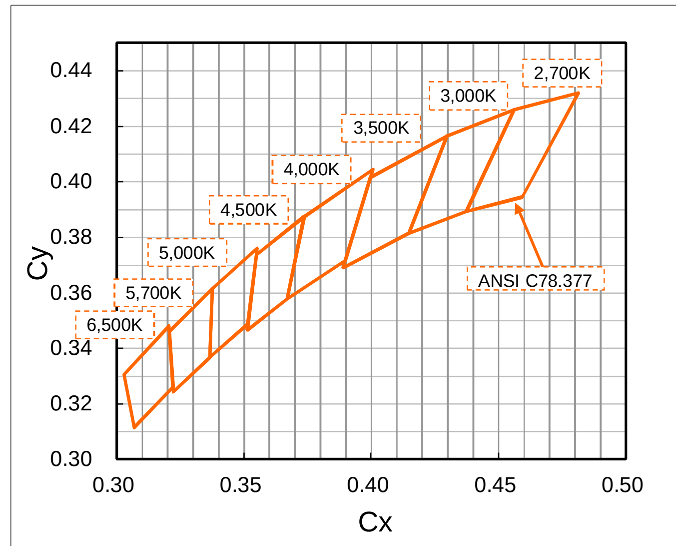


図 5. ANSI 規格 (各色温度に対する色度座標 Cx,Cy の ANSI による規格)

1．5 演色評価数

光がある物体を照射した時、その物体の色再現性の観点から、光の質を表すのに演色評価数が用いられます。一般に、自然光を基準として、自然光を照射した場合の見え方と比較して、それに近いほど良い、または優れると判断されます。色再現性に正確さを要求される専門分野では、数値化された客観的な判断基準が設定されており、日本では平均演色評価数が主に用いられます。

演色評価数とは、15 色の試験色に CIE が定めた基準光 (日本では JIS Z8720 で規定しています [6]) と測定対象になる試験光を照射したとき、生じた色のずれを、指標 R1～R15 として表したものとなります。試験光による物体の色の見え方の評価を行うものです [6]。演色評価数には平均演色評価数 (Ra) と特殊演色評価数 (R9～R15) があります。平均演色評価数 (Ra)は R1～R8 の 8 色の演色評価数を平均化したものです。基準光を照射した時の物体の見え方を平均演色評価数 Ra=100 として、試験光に照射された物体の色がそれに近ければ近いほど演色性が高く、平均演色評価数の値が 100 に近づきます。逆に、色の違いが大きいほど、数値が下がります。よって、Ra の数値が高い光源のほうが自然光に近く、それに照射される物体の色がより自然に見えます。表 2 に、主な照明用光源の平均演色評価数を示します。一般に、家庭でよく使われている蛍光灯は 3 波長蛍光ランプで、Ra = 84 となっています。

照明用白色 LED の Ra に関しては、発光効率重視の高効率タイプで Ra が低いものから、演色性重視の高演色タイプなどが商品化されています。現在の技術では、演色評価数と LED の明るさはトレードオフの関係になっており、用途によって選択することが有効です。

表 2．主な光源の平均演色評価数

光源	平均演色評価数
白熱電球	100
普通蛍光ランプ	60～75
3 波長蛍光ランプ	84
Hf 蛍光ランプ	84～93
電球形蛍光ランプ	84
高演色蛍光ランプ	89～99

2. 光の明るさを表す単位系

光の強さと明るさとは、異なる概念です。光の強さとは、光を電磁波である放射量として扱かう場合に使用されます。それに対して光の明るさとは、放射量に人間の目の感度を考慮した測光量という概念を示しています。放射量は放射束 (radiation flux) という単位で表し、測光量は基本的に光束(luminous flux)という単位で表します。測光量にはその他にも、光度、照度、輝度の表し方があります。ここでは光の強さと明るさを示すさまざまな単位を紹介します。

2.1 放射束

放射束(radiation flux)とは、あるエネルギー発生源から単位時間当たりに放射されるエネルギーの量で、記号はΦ_e、単位はワット(W)で表します。光のような電磁波のみではなく、エネルギーの放射であればすべて放射束の概念を適用できます。そのため、熱波や音波も放射束と適用されます。光の放射束は、光をエネルギーとして扱う単位なので、人間の目にはどう見えるかは考慮されていません。紫外線や赤外線のように、どれだけ放射束が大きくても人間の目には見分けることが出来ません。また、同じ大きさの可視光線の放射束でも、色によって人間の目で感じ取る明るさが異なります。

2.2 視感度

1.1で述べたように、光源から放射された光の中で、人間の目に感じることのできる波長領域は、一般に 380～780nm の可視光領域です。目の光に対する感度は波長によって異なります。その度合を表すものが視感度になります。視感度には個人差がありますが、CIE によって、標準分光視感効率 (標準比視感度ともいう) :V(λ)が定められています [8]。図6にその標準分光視感効率V(λ)を示します。

明るい場所では、多くの人が波長 555nm の光を一番明るく感じます。一方、暗い場所では 510nm となります。図6は、明所の最大視感度となる波長 555nm の光に対して、人間が感じる明るさを1としたとき、同じ放射束のそれぞれの波長に対する視感度の比を表しています。例えば、放射束が同じであっても、人間の目で見た場合、470nm の青色光や 650nm の赤色光は、555nm の緑色光の約 10 分の 1 の明るさにしか感じないことになります。

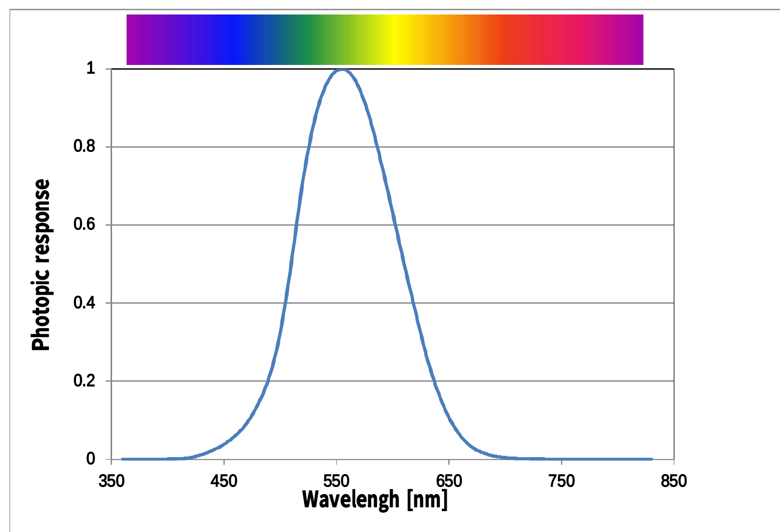


図6.CIE 標準分光視感効率:V(λ)

2.3 光束

光源の明るさを定量的に評価するためには、いくつかの測光量を用います。測光量は基本的に光束(luminous flux)という単位で表します。光束の記号はΦ_v、単位はルーメン (lm) で表します。放射量に人間の目の感度特性を考慮したものが測光量となるため、放射束に分光視感効果度を掛け合わせたものが光束となります。分光視感効果度とは、放射量から測光量を導く場合、最大視感効果度K_mと図6で示す CIE 標準分光視感効率 V(λ)の積として表されます。記号は$\mathrm{K}(\lambda)$、単位はルーメン毎ワット (lm/W) となります。以下の式で与えられます。

$$\mathrm{K}(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda)$$

最大視感効果度K_mとは、標準分光視感効率 V(λ)が最大となる波長 (555nm) における標準分光視感効果度を示します。その値は、$K_m = 683[lm/W]$と定められています。

つまり、単色光の光束は以下の式、

$$\Phi_v = K_m \times \Phi_e[\lambda] \times V[\lambda]$$

で求めることができます。

したがって、波長 555nm の放射束が 1W の光の光束は、

$$683\left[\frac{lm}{W}\right] \times 1.0[W] \times 1.0 = 683[lm]$$

となります。

555nm 以外の単色光の光束を求めるときは、それぞれの波長における CIE 標準分光視感効率を図6から求め、掛けなければなりません。

また、白色 LED のような広帯域のスペクトル光源の光束を求める場合は、すべての単波長における光束を足し合わせる必要があります。つまり光束をすべての波長領域で積分することになります。放射束の分布が、$\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$であるとき、光束は次の式で与えられます [2)]。

$$\Phi_v = K_m \int_0^\infty \Phi_{e,\lambda}(\lambda)V(\lambda)d\lambda$$

2．4 光度

光度とは、光源から放射する光の単位立体角当たりの光束を表します。単位はカンデラ (cd) を用います。光度は光束を立体角で割ったものとなり、

光度[cd] = 光束 [lm] / 立体角[sr]

と表されます。ここで、立体角は空間における立体角度のことを表し、単位はステラジアン(sr)を用います。図7に示すように、1[sr]とは半径 r=1の球面上で、表面積が 1 となるような立体角ωのことを示します。

光度は単位立体角内に放射されるすべての光束の量となるため、図7で示すように、立体角ωを囲む円錐の高さが変わっても立体角が変わらないため、円錐内を通る光束は変わりません。

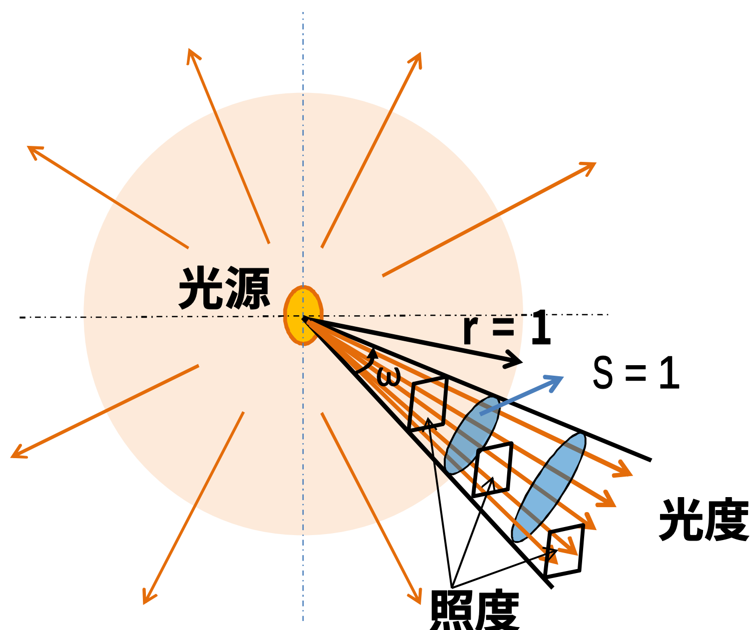


図7．光度と照度のイメージ

2．5 照度

照度とは、光の照射を受ける面の単位面積当たりに入射される光束を示します。単位はルクス (lx) で表します。照度は下記のように表記できます。

照度[lx] = 光束[lm] / 面積[m²]

同じ面積であっても、光源からの距離によって照度が異なってきます。図7で示すように、同じ面積でも、光源から離れるほど入射される光束が少なくなることが分かります。このように、照度は光源からの距離に依存します。

2．6 輝度

輝度の単位はカンデラ毎平方メートル[cd/m²]です。光度はある点光源からの単位立体角にどれだけの光束が貫くかを表すのに対して、輝度はある方向に対する光源の単位面積あたりから放出される光束を示すもとなり、1 平方メートル当たりの光度[cd]で表されます。輝度は主にディスプレイなどの明るさを示す用途に用いられます。

2．7　測光方法の関連規格

以上で、光源の強さと明るさを表す単位系及びそれらの相互関係を説明しました。実際に LED の測光量を求める時は、LED の特性を考慮して測定する必要があります。砲弾型や表面実装型 LED 単体の測光方法の規格として JIS C8152[9]やその元となる規格 CIE 127[10]がありますので、それらを参照するとよいでしょう。

3：まとめ

本アプリケーションノートでは白色 LED の色や明るさなどに関わる用語と単位系を紹介しました。これらの用語と単位系を理解することで、LED の選択や照明器具の設計に大いに役に立つことを期待します。測定法や単位系を使い分けすることにより、照明器具の特性を明確にすることができます。また、単位系の相互関係を把握することにより、LED 単体から照明器具の特性、及び照明される空間の光環境設計を、より一層有効に行うことができると考えます。

参考文献

1) JIS Z 8120: 光学用語(2001).
2) LED 照明推進協議会編：LED 照明ハンドブック.(2006)
3) JIS Z 9112:蛍光ランプの光源色及び演色性による区分(2004).
4) CIE(1931): Standard Colorimetric System (1931).
6) JIS Z 8701: 色の表示方法 (1999).
6) JIS Z 8720: 測色用標準イルミナント（標準の光）及び標準光源(2000).
7) JIS Z 8726: 光源の演色評価方法 (1990).
8) CIE(1924): Luminous efficiency functions (1924) .
9) JIS C 8152: 照明用白色発光ダイオード（LED）の測光方法 (2007).
10) CIE 127: Measurement of LEDs (2007).

製品取り扱い上のお願い

- 本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステム（以下、本製品という）に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、一般的電子機器（コンピュータ、パーソナル機器、事務機器、計測機器、産業用ロボット、家電機器など）または本資料に個別に記載されている用途に使用されることが意図されています。本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、電力機器、金融関連機器などが含まれます。本資料に個別に記載されている場合を除き、本製品を特定用途に使用しないでください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず弊社営業窓口までお問合せください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。